Proceedings of the Korean Superconductivity Society Meeting 2000
(KSS 2000), YongPyung, Kangwondo, Korea, Aug. 16-18, 2000

Characteristics of directly-coupled single-layer second-order high Tc SQUID gradiometer

Yunseok Hwang[a, b], Sunkyung Moon[a], Jong Rok Ahn[a], Soon-Gul Lee[a], Jin-Tae Kim[b]
[a] *Korea University, Seoul, Korea*
[b] *Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea*

Received 22 July 2000

Abstract

We have fabricated directly-coupled single-layer second-order high-Tc SQUID gradiometer. The gradiometer consisted of 3 parallel-connected square pickup loops, and each loop was directly coupled to SQUID. YBCO thin film was deposited by pulsed laser deposition and patterned by photolithography with ion milling technique. Optimum balancing condition was achieved by varying the outer diameter of the center loop. We have investigated nearly zero response of the SQUID to uniform and 1st-order field gradient.

Keywords : Gradiometer, YBCO, High-Tc

I. 서론

SQUID(Superconducting Quantum Interference Devices)는 기존의 자기 센서들이 따를 수 없는 높은 감도(10^{-14} Tesla) 때문에 일찍이 그 실용화를 위한 연구가 진행되어 왔다[1]. 고온초전도 SQUID 자기 센서는 ~100 fT/Hz$^{1/2}$ (@ 1 Hz)의 감도를 가지고 있어서, 구리 코일로는 측정이 불가능한 극미세 자기신호의 검출이 가능하여 SQUID의 응용분야 중에서도 특히 비파괴 평가 분야[2]에 응용할 경우 그 활용범위가 넓고 산업계에 파급효과가 크다. SQUID를 이용한 비파괴 평가 장치의 핵심기술은 SQUID 센서이다. SQUID에 대한 연구는 상대적으로 높은 감도를 가진 dc SQUID[3]에 집중이 되어 있다. 비파괴 평가에 응용하기 위해서는 비차폐 환경에서 작동하는 SQUID 센서가 필요하다. dc SQUID gradiometer는 지자기나 주변 환경에서 발생되는 자기 잡음을 제거할 수 있는 소자로 활발한 연구가 진행되고 있다[4]. 일반적으로 저온초전도 SQUID gradiometer의 경우에는 다층박막 형태로 제작한다[5], [6]. 그러나, 고온초전도의 경우에는 다층박막 제작이 쉽지 않고, 잡음 특성도 좋지 않다. 이에 반해, 직접 결합형 SQUID garadiometer는 다층 박막 형태에 비해 제작과정이 단순하여 많은 연구가 수행되어 왔다[7], [8]. 그러나, 직접 결합형 단일층 1st-order gradiometer는 지자기 환경에서는 노이즈 영향으로 인해 측정에 충분하지 않을 수도 있다. 본 연구에서는 비자기 차폐환경에서 작동하기 위해 외부 잡음에 영향을 거의 받지 않고 magnetometer나 1st-order gradiometer에 비해 신호-대-잡음 비가 우수한 단일층 박막형태의 직접 결합형 2nd-order dc SQUID를 제작하여 특성조사를 하였다.

II. 이론

Figure 1은 2nd-order SQUID gradiometer에 대한 개략도이다. 오른쪽 loop과 왼쪽 loop은 같은 인덕턴스 값과 면적을 가지고 있다. 만약, 균일 자장이 왼쪽 loop에만 걸리면 차폐전류 I_L=-BA/L이 흐르게 되고 이로 인해 SQUID에서

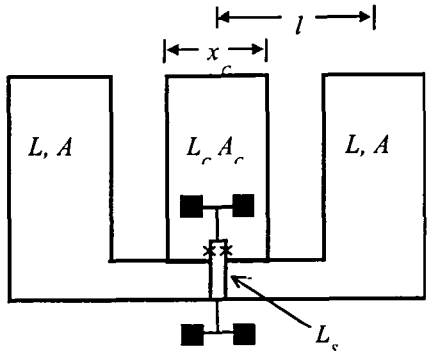

Fig. 1. Layout of the directly coupled 2nd-order SQUID gradiometer

의 자속은 $\Phi_{S,L}=\alpha_L BAL_S/L$가 된다. 마찬가지로 오른쪽 loop에 의한 자속은 $\Phi_{S,R}=\alpha_R BAL_S/L$가 된다. 또, 중심 loop에 자장이 걸리면 자속은 $\Phi_{S,C}=-\alpha_C BA_C L_S/L_C$가 된다. 여기서 α_L과 α_C는 각각 왼쪽 loop과 중심 loop에서 SQUID에 대한 coupling coefficient이다. 균일 자장이 SQUID loop 전체에 걸렸을 때, 이 자장에 의한 영향을 상쇄시키기 위해서는 다음과 같은 balancing 조건이 필요하다.

$$\frac{A_C}{A}\frac{L}{L_C}=\frac{\alpha_L+\alpha_R}{\alpha_C}=\frac{2\alpha}{\alpha_C}$$

단, $\alpha=\alpha_L=\alpha_R$

한편, 1차 미분형 자장이 걸리는 경우에는 다음 식과 같이 기술할 수 있다.

$$\Phi_S=-\frac{\alpha_L(\Delta B)AL_S}{L}+\frac{\alpha_R(\Delta B)AL_S}{L}$$

위 식에서 첫째 항은 왼쪽 loop에 의한 자속 $\Phi_{S,L}$이고 두 번째 항은 오른쪽 loop에 의한 자속 $\Phi_{S,R}$이다. 그러므로, 1차 미분형 자장하에서는 α_L과 α_R이 같으면 즉, 양쪽 pickup loop이 중심 loop에 대해 구조적으로 대칭만 되면 그 영향이 자연적으로 상쇄된다.

III. 실험 방법 및 결과

10 × 5 mm² 크기의 단결정 $SrTiO_3$ (100) 기판 위에 photolithography법을 이용하여 Ar ion milling으로 200 nm 높이의 step을 제작하였다. 이때, ion gun과 기판의 법선 사이 각은 30°, 회전각은 15°로 하였다. 자세한 내용은 참고 문헌[9]에 잘 나와 있다. 이렇게 하여 얻은 step 각은 약 70° 정도이다. 접합의 수율을 향상시키기 위하여 제작된 step을 1050 °C 산소 분위기에서 1 시간동안 열처리 하였다[10]. 그 위에 중심 파장이 248 nm인 KrF 엑시머(excimer) 레이저를 사용하여 pulsed laser deposition(PLD)으로 $YBa_2Cu_3O_7$ 박막을 150 ~ 180 nm 정도 두께로 입혔다. 증착시 산소 압력과 기판의 온도는 각각 400 mTorr와 790 °C로 유지하였고, 증착 후 시료를 500 °C 산소 1 기압 하에서 1 시간 동안 열처리 하였다. 여기에 다시 photolithography법과 ion milling을 이용하여 figure 1과 같은 모양으로 센서를 제작하였다.

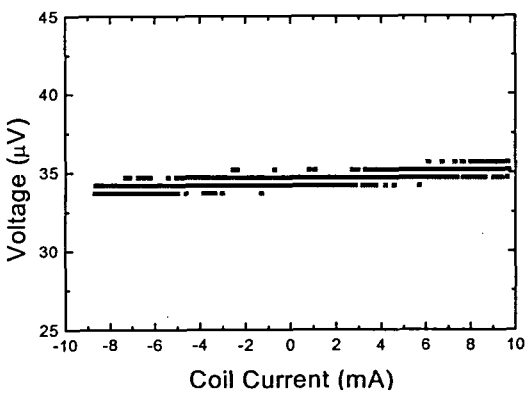

Fig. 2. Modulation signal of 2nd-order SQUID gradiometer in 1st-order gradient fields.

제작된 2nd-order gradiometer는 크게 pickup loop, modulation coil, 그리고 SQUID 부분으로 구성되어 있다. 왼쪽 loop의 중심에서 중심 loop의 중심까지의 거리가 3 mm이고 SQUID inductance L_S = 40 pH 정도이다[11], [12]. 접합 폭은 3 μm이고 SQUID hole 크기는 3 μm × 54 μm이다. Pickup loop들이 서로 붙어있는 SQUID

gradiometer의 경우에는 1차 미분형 자장의 영향이 완전히 상쇄되지 않기 때문에[13] 각 loop를 떨어뜨려 놓음으로써 각 loop간의 coupling factor가 영향 받는 것을 배제하였다. 이렇게 제작한 SQUID gradiometer의 1차 미분형 자장에 대한 balancing error는 2×10^{-4} 이하가 나왔다(Fig. 2).

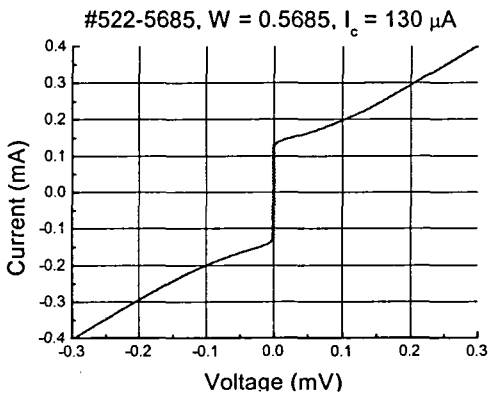

Fig. 3. I-V characteristics of 2nd-order SQUID graiometer.

다음으로 SQUID gradiometer의 중심 loop 선폭(W)만을 변수로 두고 선 폭의 변화에 따른 균일 자장에 의한 modulation 신호를 검출하였다. 선 폭을 변수로 둔 이유는 중심 loop의 인덕턴스 값 L_C를 조절해 줌으로써 내부적인 balancing 문제를 해결하기 위해서이다. 선 폭 W는 0.18 mm부터 0.75 mm까지 변화시켰다. Figure 3는 제작된 SQUID gradiometer 중 하나에서 얻은 전류-전압 특성 곡선이다. 중심 loop의 선 폭 W가 증가함에 따라 SQUID modulation의 신호 주기가 점차 증가하다가 W = 0.56 mm 부근을 기점으로 다시 감소하였다. 즉, SQUID gradiometer의 내부적인 balancing 문제를 포함한 전체적인 balancing 조건을 만족하는 W의 값이 0.56 ~ 0.57 mm 사이에 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 부근을 중심으로 W를 미세하게 변화시켜가며 modulation 주기를 측정해 본 결과, figure 5에서 볼 수 있듯이 0.566 ~ 0.569 mm 사이에서 modulation의 편차가 심하게 나타났다. 이에 대한 이유로 다음과 같은 원인을

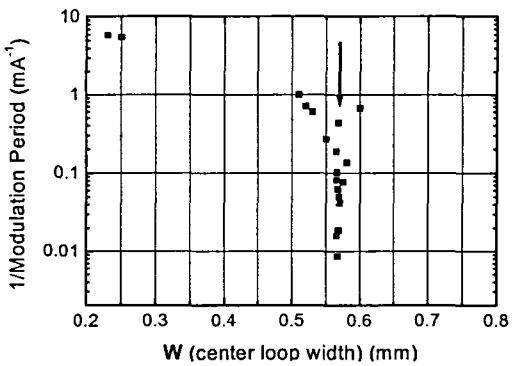

Fig. 4. 1/modulation period vs. center loop line width graph.

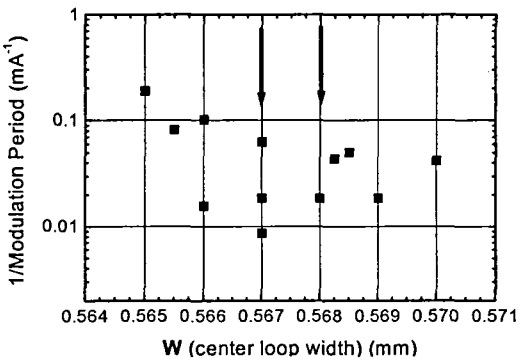

Fig. 5. Detail view of figure 4.

생각해 볼 수 있다. SQUID pattern을 위한 PR 작업시 정확한 선 폭이 나오지 않을 수 있다. 만약, 0.1 μm의 선 폭 변화가 생긴다면 중심 loop의 선 폭은 전체적으로 0.4 μm의 변화량을 갖게 된다. 또, Ar ion milling시 깎이는 선이 정확하게 조절되지 않을 수 있다. 기판에 대한 ion beam의 입사각에 따라 선 폭의 변화가 생길 수 있는데, 실험에 사용한 PR의 두께가 대략 1.4 μm인 것과 5° 정도의 입사각 차이만을 감안하더라도 깎이는 선의 오차는 대략 0.5 μm 가 나온다. 따라서, 제작 공정의 재현성 문제만 해결된다면 훨씬 좋은 성능의 SQUID

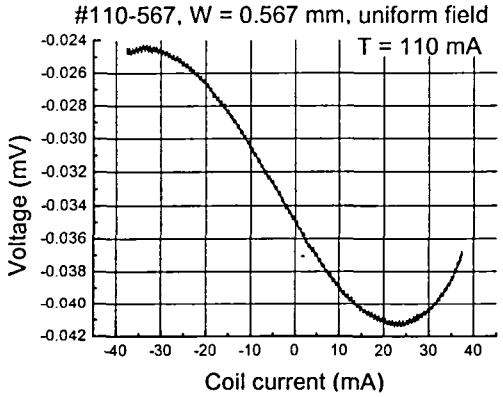

Fig. 6. Modulation signal of 2nd-order SQUID gradiometer in uniform fields.

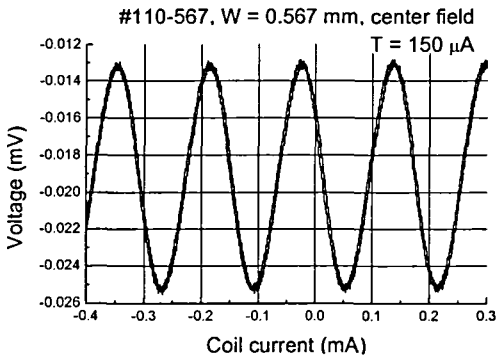

Fig. 7. Modulation signal of 2nd-order SQUID gradiometer in local fields is applied in center loop.

gradiometer를 제작할 수 있을 것이다. 현재까지 실험을 통해 얻은 modulation의 최대 주기는 110 mA로 0ff-balancing factor가 대략 0.07 % 이다.

IV. 결론

2nd-order dc SQUID gradiometer 센서를 직접 설계, 제작하여 특성 조사를 하였다. 연구결과는 앞에서 보인 바와 같이 2nd-order gradiometer에 대한 이론적인 이해를 바탕으로 균일 자장과 1차 미분형 자장에 영향을 거의 받지 않으면서 2차 미분형 자장에는 민감하게 반응하는 센서를 개발하였다. 현재까지 개발된 gradiometer 센서의 off-balancing factor는 균일 자장 하에서는 2×10^{-4} 이하이고 1차 미분형 자장 하에서는 0.07 %로 나왔다. 본 연구팀에서 개발한 2nd-order gradiometer는 일반적인 다층 박막 형태가 아닌 직접 결합형 단일층으로, 제작이 용이하고 기존의 magnetometer나 1st-order gradiometer에 비해 신호-대-잡음 비가 우수하여 비파괴 평가 시스템과 같이 비자기 차폐 환경이 요구되는 곳에 유용할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 국방부의 민군겸용기술사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

[1] D. Cohen, E. A. Edelsack, and J. E. Zimmerman, Appl. Phys. Lett. 16, 278 (1970).
[2] H. Weinstock, and M. Nisenoff, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 5A, Plenum Publishing Corporation, New York, pp. 699-704 (1986).
[3] R. C. Jaklevic, J. Lambe, A. H. Silver, and J. E. Mercereau, Phys. Rev. Lett. 12, 159 (1964).
[4] J. E. Zimmerman and N. V. Frederick, Appl. Phys. Lett. 19, 16 (1971).
[5] W. Eidelloth, B. Oh, R. P. Robertazzi, W. J. Gallagher, and R. H. Koch, Appl. Phys. Lett. 59, 3473 (1991).
[6] M. B. Ketchen, W. M. Goubau, J. Clarke, and G. B. Donaldson, J. Appl. Phys. 44, 4111 (1978).
[7] G. M. Daalmans, L. Bar, M. Kuhnl, D. Uhl, M. Selent, and J. Ramos, IEEE Trans. Ppl. Supercond. 5, 3109 (1995).
[8] V. Zakosarenko, F. Schmidl, H. Schneidewind, L. Dorrer, and P. Seidel, Appl. Phys. Lett. 65, 779 (1994).
[9] 남병창, 김인선, 이순걸, 박종철, 박용기, 한국재료학회지, 8, 950 (1998).
[10]H. choi, Y Hwang, J-T Kim, D Lee, S-G Lee, Y K Park, and J-C Park, Proceedings of the Korean Superconductivity Society, 9, 87 (1999).
[11]J. M. Jaycox, and M. B. Ketchen, IEEE Trans. Magn.

MAG-17, 400 (1981).
[12]F. W. Grover, Inductance Calculations, Working Formulas and Tables (Dover, New York, 1962).
[13]Soon-Gul Lee, Yunseok Hwang, Byung-Chang Nam, Jin-Tae Kim, Yong Ki Park, and In-Seon Kim, Appl. Phys. Lett. 73, 2345 (1998).